

Müontomográf mérések modellezése

Szakmailag ellenőrizte: Molnár Gábor

Absztrakt

A müontomográf kutatás során kozmikus müon részecskék fluxus mérési eredményéből hegységek vagy más objektumok sűrűsége szerkezetét vizsgálják. Dolgozatomban a WIGNER Fizikai Kutatóközpont Királylakai-tárában (Budai-hegység) végzett üregkereső projektjén keresztül ismertetek egy valós müontomográf kutatást.

Bemutatom, hogy a mérés és az eredmények feldolgozása során milyen paraméterek befolyásolják a keresett üreg megtalálhatóságát. Majd létre hozom a saját modelletemet, amiben szimulált méréseket végzek, majd a szimulált mérési eredményeimet geofizikai inverzióval feldolgozom és végeredményként megkapom a hegyoldal sűrűsége szerkezetének kétdimenziós képét. Modellezem a zavaró tényezőket és jellegzetes hatásait egyesével megvizsgálom, megállapítom, hogy pontosan hogyan befolyásolják az üreg megtalálhatóságát és a hegység sűrűsége szerkezetének képét.

1.A földkéregbe hatoló müonok – a müontomográfia alapja

Földünket bombázó kozmikus részecskék a felső légkörben további részecskékre bomlanak. Köztük az elektronnal töltöttségében megegyező, de annál 207-szer nagyobb tömegű, közel fénysebességgel terjedő müon részecskék. A dolgozat szempontjából azért érdekesek, mert képesek könnyen mérhető mennyiségben nagyobb mélységekbe – akár 1.000 méternél is mélyebbre – hatolni, emellett a müonok mozgási energiáját az ionizációs fékeződés folyamatosan csökkenti, amikor valamilyen anyagon kell keresztül haladniuk. A fékeződés mértékét a müon fluxus mérésével tudjuk megfigyelni, mértéke kvázi fordítottan arányos a müonpálya által kijelölt közet vagy levegőoszlop átlagsűrűségének és hosszának szorzatával, vagyis a sűrűségösszével. [Oláh L. 2017]

2. Egy müontomográf mérés bemutatása

A következő részben bemutatom a REGARD kutatócsoport (a WIGNER Fizikai Kutatóközpont, az MTA Lendület Innovatív Detektorfejlesztő Kutatócsoportja és az ELTE együttműködésében) által kifejlesztett müondetektor pontos működését. . Ismertetem egy korábbi mérésüket, azoknak körülményeit. A dolgozat fő célja, hogy a bemutatott konkrét példából kiindulva egy egy valóságos mérési szituációt bemutató modellt hozzak létre. Miután bemutattam, hogy egy müontomográf mérés és az eredmények feldolgozása során milyen paraméterek befolyásolják a keresett üreg megtalálhatóságát, létre tudom hozni a saját modelletemet, amiben szimulált méréseket végzek, majd a szimulált mérési eredményeimet geofizikai inverzióval feldolgozom és végeredményként megkapom a hegyoldal sűrűsége szerkezetének kétdimenziós képét. A zavaró tényezők jellegzetes hatását egyesével

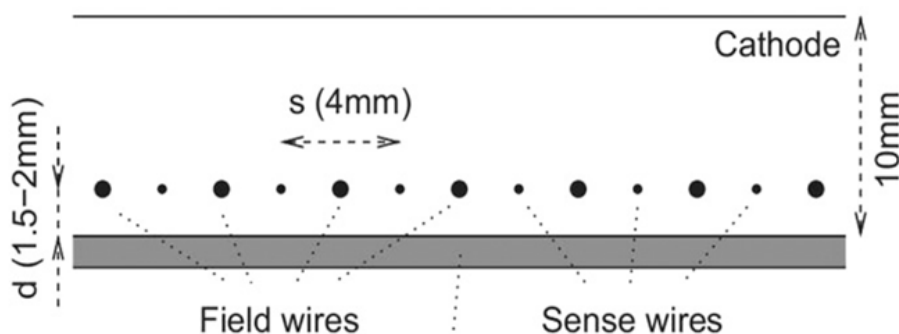
megvizsgálom, hogy megállapítsam, hogy ezek a tényezők pontosan hogyan befolyásolják az üreg megtalálhatóságát és a hegység sűrűsége szerkezetének képét.

2.1. A müonok detektálása

A müonok térszög szerinti fluxusának mérésére szolgáló eszközt müondetektornak nevezzük. A müondetektoros tomográfikus mérés alapja, hogy a detektort úgy helyezem el, hogy a mérendő objektum (pl.: hegység) a müonok forrása (felső légkör) és a detektor közé essen. Ideális mérési helyszín a föld alatti barlangok, alagutak, aknák, amelyekben alulról monitorozhatjuk a környezetet. A dolgozatomban elvégzett szimulációk egy olyan detektorra vonatkoznak, amelyhez hasonló eszközöket a REGARD kutatócsoportban (a WIGNER Fizikai Kutatóközpont, az MTA Lendület Innovatív Detektorfejlesztő Kutatócsoportja és az ELTE együttműködésében) fejlesztenek.

A müondetektor sokszálas proporcionális kamrákból áll. A detektor négy vagy öt panelből áll, amelyek egymás alatt, párhuzamosan helyezkednek el. A paneleken találhatóak a 32 cm x 32 cm x 1 cm méretű, a müonok beesését két dimenzióban detektáló kamrák. Egy kamrához kétféle szál, egy vastagabb (100 μm) térformáló (field wires) és egy vékonyabb (21 μm) keresztmetszetű anódszál (sense wires) tartozik. A szálakkal merőlegesen irányban azoktól 1,5 mm távolságra 4 mm x 320 mm területű vezető felületekkel, ún. parkettákkal osztják fel a paneleket. A kamrákat argon és széndioxid 80:20 arányú keverékével töltik fel. Az anódszálak és a térformálószálak közötti feszültséget az anódszálak pozitív elektromos töltöttségével érik el. A kamrába érkező müonok ionizálják a gázt, centiméterenként kb. 100 elektront keltve. A keltett elektronok a vezető szál közelében felgyorsulnak, így nagyobb energiájukkal képesek tovább ionizálni a gáZRészecskéket, majd az új leszakított elektronok még több elektront szakítanak le, egy lavina effektust keltve a kamrán belül. 103 -104 darab elektron már jelként érzékelhető, amelyet tovább erősítenek 105 -106 db elektron mennyiségre. Az anódszál körül felhalmozódnak a negatív elektronok, a térformáló szálak körül felhalmozódó pozitív ionfelhő tükörtöltése a merőleges irányban lévő parkettákon is érzékelhetővé válik. Így a beérkező müon két dimenzióban ad magáról jelet a panelen. A közelkatódos kamra vagy CCC belső szerkezetét az 1. ábrán láthatjuk. [Oláh et al. 2013]

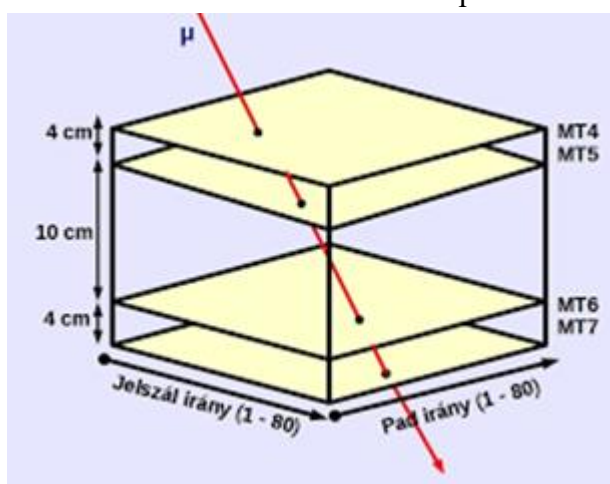
1. ábra: A közelkatódos kamra belső szerkezete



[forrás: Barnaföldi et al. 2012]

A mérést elindító trigger jelként a felső két panel valamelyikén, és az alsó két panel valamelyikén egyszerre megszólaló jelszál-parketta párok (továbbiakban csatornapárok) generálják. Ezzel kiszűrjük azokat a jeleket, amelyeknek nincs kapcsolata más panelen belüli jeleseménnyel, mivel biztosan nem köthetők egy müon hatásához. A nem müon eredetű jelesemények kiváltó oka valószínűleg véletlenszerű, gázrészecskék alfa vagy béta bomlásából származó elektronok ionizációs hatása. Az öt panelen egyszerre megszólaló csatornákra egy egyenest illesztünk és így már három dimenzióban láthatjuk a beérkezések irányait. Elméletben már két detektorréteg is elegendő lenne az egyenesek megalkotására, hárommal már ellenőrizhető is, viszont négyel már észlelhetőek a nem ritka esetek is, amikor az egyik panelen nem keletkezik elektromos jel, és így ott nem mérhető a részecske beérkezése. Egy adott irányból érkező müon megtalált pályáját 'track'-nek nevezzük. A 2. ábrán látható egy másik típusú, csak négy panellel rendelkező közelkatódos kamrából épített müontomográf. A 2. ábrán látható piros egyenes egy lehetséges müonpályát jelöl. [Barnaföldi et al. 2011]

2.ábra: Egy 4 párhuzamos síkú közelkatódos kamrából épített müontomográf vázlatos rajza.



[forrás: Barnaföldi G. et al. 2011]

A REGARD kutatócsoport által épített müontomográf megtervezésénél figyelembe vették a fenti feltételeket és a barlangi terep sajátosságait. Könnyen hordozható, 13 kg tömegű, a szűkös járatokra optimalizált 51 cm x 46 cm x 32 cm térfogatú detektort építettek meg. A barlangokban a páratartalom a 100%-ot is elérheti. Ilyen környezetben lehetetlenség lett volna mérni a magas feszültségű eszközökkel, ezért a detektort egy légmentes dobozban tárolták. Fogyasztása csupán 5 W, ellátását akkumulátorokkal biztosították. A gázellátását 10 literes, 150 bar nyomású gázpalackok biztosították. [Oláh et al. 2012]

2.2. Mérési eredmények előfeldolgozása

2.2.1. A detektált müonok számából müonfluxus számítás

A felszín alatt akár több száz méterrel már jócskán lecsökken az érkező müonok száma. A beérkező jelmennyiség csökkenés miatt csökken a mérés határfoka, ami az érzékelőfelület nagyságának, valamint a mérési idő növelésével orvosolható. A teljes müonhozam ismeretéhez figyelembe kell vennünk a nem észlelt eseményeket is. A müonok ionizálják a gázt, majd a gáz újratöltődéséig mérési holt idő alakul ki, amikor a detektor nem észlel. A teljes müonhozam kiszámolásához hozzá kell adnunk a holtidőbeli valószínűsített beérkezéseket.

Kiszűrődőek azok a kis szögben érkező müonok is, amelyek nem keresztezik az összes panelt. Ám ennek fordított esete is fennáll, amikor a müon valójában átmetszi mind az öt panelt, de valamilyen nem mindegyiken érkezik be róla jel. A detektor pontatlanságának valószínűségét kísérleti módszerekkel számították ki.

Az öt panel és az említett hibalehetőségek kiszűrése miatt a detektor hatásfoka kb. 95%. A detektor hatásfoka a beérkezési szög függvényében számítható ki. A detektor 45°-nál laposabb szögben nem detektál elegendő számú tracket ahhoz, hogy megbízható eredményt kapjunk. Így a tomográffal egy 90°-os nyílású, a detektor síkjára merőleges tengelyű kúp belsejéből nyerhetünk ki információt. A teljes teret egy adott pozícióból a detektor megdöntésével térképezhetjük fel.

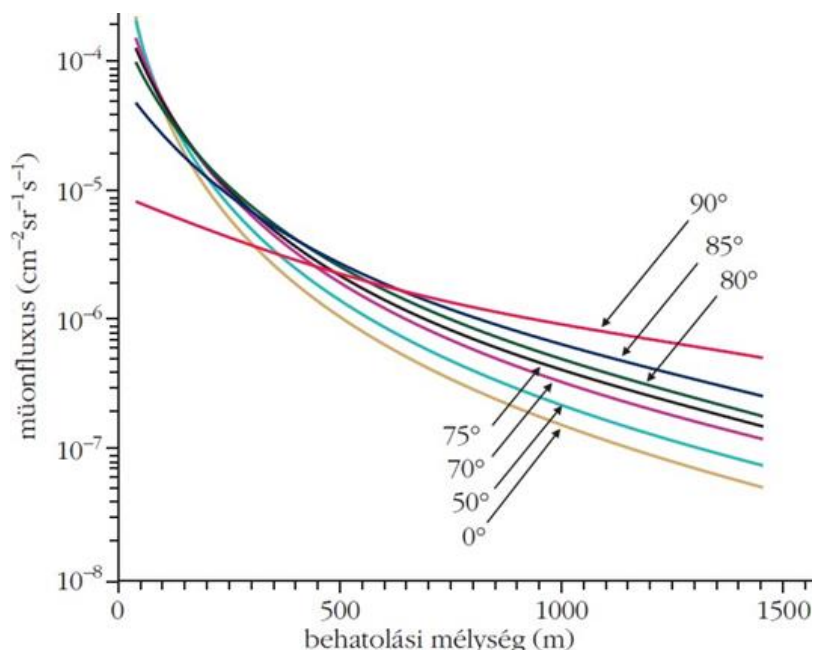
A detektorba azonos térszögből érkező müon beérkezések számát összegezzük és elosztjuk a detektáló felület nagyságával és a mérési idővel. Ezzel megkapjuk az adott irányhoz tartozó müonfluxust. A detektor által érzékelt müonok beesési irányszöge valójában egy szögtartományra utal.

Egy adott térbeli irányból érkező és a detektor által detektált müonok száma arányos a detektornak az adott irányba eső effektív felületével. Ahhoz, hogy olyan fizikai mennyiséget kapjunk, ami független a detektor geometriai jellemzőitől, a valamely irányból érkező müonok számát el kell osztanunk a mérési idővel, a detektor adott irányra vonatkozó effektív felületével és az adott irány körüli térszöggel, amelyből a detektorra érkező müonokat detektáljuk. Ez a mennyiség a sugárzástanban definiált radianciával analóg mennyiség, azonban a részecskedetektorok szakirodalmában a fluxus szót használják a radiancia helyett. Az adatfeldolgozó során egy a detektor feletti féltérlet lefedő 2D fluxus térképet készítenek, amelyhez olyan szög szerinti felosztást (binézést) alkalmaznak, ami összhangban van a tomográf fizikai felbontásával. Az említett tomográf esetén ez közel 1°. [Barnaföldi G. 2011]

2.2.2. A müonfluxus eredményekből sűrűség hossz számítás

A müonfluxus sűrűség hossz váltásakor figyelembe kell venni, hogy a müonok pályáját metsző légköri részecskék is fékező hatásúak. Emiatt a felsőlégkör és a felszín közötti szakaszon történt energiacsökkenés a zenit irányában 1,5 GeV, ami más irányokban a szög koszinuszának négyzetével fordított arányosan nő, hiszen az alacsonyabb szögmagasságban megnő a müonok által harántolt légkör vastagsága. Azonban a nagyobb zenitszögek vastagabb légkörében a primer részecskék nagyobb eséllyel bomlanak müonokká. Így habár több müon érkezik az alacsonyabb térszögekből, a vastagabb légkör nagyobb fékező hatása miatt összességében kevesebb részecske éri el a felszínt. Csak azok a részecskék érik el a felszínt, amelyek megfelelően nagy energiával rendelkeznek, hogy áthatoljanak a vastag légköri rétegen. Így az alacsony szögekből kevesebb, de nagyobb nagyenergiájú müon hatol be a felszín alá. Emiatt – homogén közetszerkezet esetén – mélyebben már a nagyobb zenitszögből érkező részecskék dominálnak. Az 3. ábrán látható, hogy 2.65 g/cm³ homogén sűrűségszerkezetű kőzetben különböző beesési szögeknél hogyan változik a müonfluxus a behatolási mélységgel.

3.ábra: Különböző zenitszögben érkező kozmikus részecskék behatolási mélység szerinti fluxusértékei



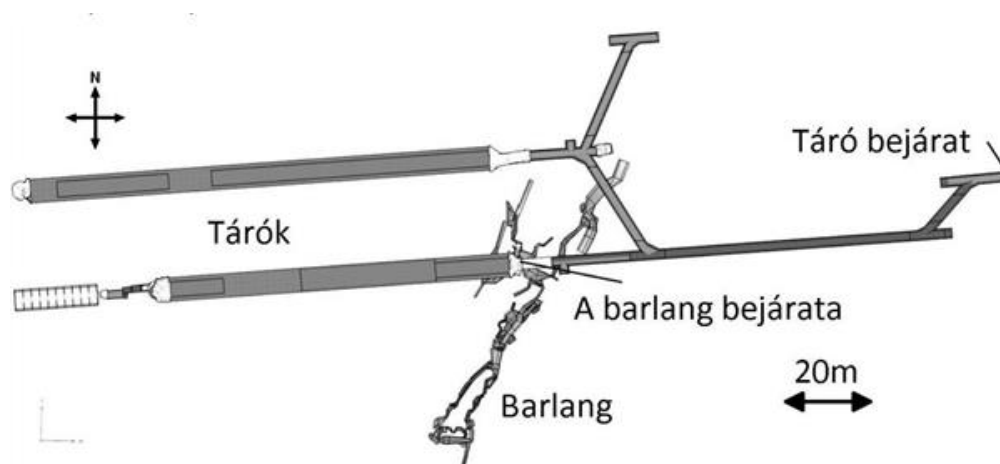
[forrás:Oláh et al., 2013]

2.3. Mérési helyszín és környezete: a Királylaki-táró

Dolgozatomban a REGARD kutatócsoport a Budai hegységhez tartozó Hármashatárhegyben található Királylaki-táróban végzett mérését modellezem. Az '50-es években épített gáztározó teljes hossza 500 méter. A 4. ábra alaprajzi nézetben látható a tárórendszer szerkezete. Az órási gáztározóhoz 5 m keresztmetszetű, 90 m hosszú metrálóagúthoz hasonló járatok vezetnek, a metrálóagutakat pedig téglafalú, kisebb járatok kötik össze.

A táró érdekességét az Ariadne Karszt- és Barlangkutató Egyesület által a járatból lefelé kiágazó barlangrendszer felfedezése adja. A csoport aprólékos munkájának köszönhetően a Hármashatárhegy leghosszabb (~300 m) barlangja vált ismertté. A feltételezések szerint a Királylaki-barlangnak elkeresztelt karszt barlangrendszer üregeinek felfedezése még befejezetlen, így a hegyoldal még számos, idáig ismeretlen barlangot rejt. [Szabó 2012] A müontomográf kutatás célja a Királylaki-barlangrendszer még ismeretlen – a táró felett elhelyezkedő - járatainak megtalálása.

4.ábra: A Királylaki-táró és a Királylaki-barlangrendszer térképe



[forrás: Szabó 2012]

2.4. A terepi mérés

A táró feletti domborzat geometriáját 100-150 m²-enként RTK GPS-szel, a táró belső geometriáját 3D lézerszkennelvel mérték meg. A befoglaló környezet a tűzköves dolomit, mely sűrűsége 2,3 és 2,7 g/cm³ között ingadozik. A szálkő nem éri el a felszínt, azt kisebb sűrűségű, (~1,5 g/cm³) lejtőtörmelék fedi. A talaj sűrűségének és a szálkő--lejtőtörmelék határ pontosabb megismerése céljából geoelektromos méréseket végeztek. A mért fajlagos elektromos ellenállás értékekből következtetni lehet a talaj és a lejtőtörmelék rétegek vastagságára). A táró és a talaj megismert paramétereivel ellenőrizhetjük a müontomográf mérések eredményéből kiolvasható táró- és talaj sűrűséget és geometriát.

A müondetektorral összesen 28 helyen mértek. A bejárat közeléből kezdték és a befelé haladtak 15-20 m-enként. A zenitirányú közetvastagság befelé haladva nőtt 20 m-ről 100 m-ig. A detektorok koordinátáját és irányszögét egymáshoz, és a tárón belüli bázispontokhoz viszonyított helyzetük alapján jegyezték fel. A detektorlemezekre merőleges iránytól nagyobb szögek szerint távolodva csökken a tomográf határfoka, hiszen egy bizonyos szöghatár alatt a müonok nem keresztezik a tomográf összes panelét. Ezt kompenzálva, egyes esetekben megdöntötték (például 45°-kal) a detektort. Egy helyszínen 10-15 napot töltött a műszer, összesen közel egy éven keresztül folytak mérések. Végül, több mint 10 millió müon pálya irányát sikerült detektálni. [Surányi 2016]

2.5. A mérési eredmények feldolgozása

A detektorból kinyerhető jeleket a hozzájuk tartozó térszögekkel kell csoportosítani. A trackekhez tartozó számokat az előző fejezetben bemutatott módszerrel kell átváltani fluxussá. A fluxus bizonytalansága a síkra merőleges irányban a legkisebb és tőle távolodva nő, hiszen a zenittől távolodva csökken a beérkező müonok száma. Ennek oka, hogy a beérkező müonok egymástól független, véletlenszerű időpontokban bekövetkező eseményeknek számítanak, amelynek bizonytalansága a Poisson-eloszlás szerint az események gyökével egyenlő. A kevesebb számú eseményekhez tartozó bizonytalanság így arányaiban sokkal nagyobb, mint a

nagyobb számú eseményekhez tartozó. Az irányokhoz tartozó fluxusértékeket egy polárkoordináta-rendszerbe helyezésekor rajzolódik ki a fluxustérkép. Erről le kell vágni a 90°-os szögnyílású kúpon kívüli nagy bizonytalanságú területeket, majd a detektor helyzete alapján át kell transzformálni a térszögeket a detektor rendszeréből a lokális koordinátarendszerbe.

Egy alagút adott pontján elhelyezett müondetektor mérési adatiból a fent részletezett módon kapható meg a fluxuskép, majd ezt a szakirodalomból ismert fluxus-zenitszög- sűrűség-hossz összefüggés szerint váltható át sűrűség-hosszá.

Érdeemes megemlítenem, hogy a detektor átesett egy teszt méréssorozaton a Központi Fizikai Kutatóintézet területén lévő 7 szintes Jánossy-aknában. A különböző szinteken (10 m- 30 m) mért müonhozam tökéletesen illeszkedtek a szakirodalomból ismert mélység-fluxus függvényre, igazolva az átváltási módszer hitelességét. [Barnaföldi G. 2011]

A fluxusképből előáll a sűrűség-hossz-térkép. Geodéziai mérési eredmények segítségével számítható a mérési helyből kiinduló egyes irányokban lévő kőzetvastagság. A detektorból kiinduló meghosszabbított irányvektor felszíni és az alagút plafonján vett metszésponja közötti távolság különbség adja meg a kőzetvastagság térképet. A sűrűség-hosszok kőzeten belüli pályahosszokkal vett hányadosából kapható meg az adott irányokra vonatkozó átlagsűrűség. A kőzetoszlopokban észlelt sűrűség csökkenésekről, ennyi információ alapján, nem lehet pontosan meghatározni, hogy az egy nagyobb barlang, vagy néhány kisebb, vagy a teljes kőzetminőség változása okozta. Ha pedig valóban egy barlang okozza a kőzetoszlopon belüli átlagsűrűségcsökkenést, még mindig nem határozható meg, hogy azon belül pontosan hol található a barlang, vagyis egy detektorral csak két dimenzióban (térszög, átlag sűrűség) mérhető meg a környezetet.

Egy barlang megtalálásához legalább két mérés szükséges. Ha egy másik detektorpontból vett méréshez tartozik olyan kis átlagsűrűségű mérési irány, amely metszi az előző mérési ponthoz tartozó kis átlagsűrűségű kőzetoszlop irányát, akkor metszéspontjukban egy üreg feltételezhető. Egyszerűbb sűrűségi szerkezetű objektumoknál elegendő két ilyen mérés az üreg megtalálásához. [Surányi 2016]

3. Sűrűségmeghatározás inverzióval

A karsztos környezet bonyolult kőzettani szerkezete miatt érdemes az összes rendelkezésre álló mérést együttesen feldolgozni. Az erre szolgáló eszköz a geofizikai inverzió. Az inverziós eljárást egy korábban közölt tanulmány alapján mutatom be [Molnár 2013].

A geofizikai inverzió a kezdetben ismert modell (direktfeladat) és a mért értékek közötti kapcsolatra keres megoldást. A mért értékek mindig hibával terheltek és soha nem egyeznek meg a kezdeti modellszámítások eredményeivel. Esetünkben mérési eredménynek a fluxusból számított adott mérési helyhez és mérési szöghöz rendelt sűrűség-hosszt tekintjük. Jelöljük y -nal.

A direkt feladat meghatározásához első lépésként cellákra osztjuk fel a mért környezetet. A modellben a legbiztosabb információ, az elemi mérések hosszai, vagyis az elemi mérések által a cellákban megtett úthosszok. Ezeket egy mátrixba helyezve, megkapjuk az A alakmátrixot, vagy a direkt feladat Jacobi mátrixa. A direkt feladat az A mátrix és a paraméterek kezdő értékeiből álló vektor szorzataként kapom meg. ($y_0=A*s_0$) A paraméterek kezdő értékei a kezdetben feltételezett cellabeli sűrűségértékek (s_0), ami legyen minden cellára 2,5 g/cm³.

A lineáris inverziós problémák közül ebben az esetben egy egyszerre alul- és túlhatározott probléma áll elő, hiszen egyes cellákon több egymásnak ellentmondó elemi mérés is

keresztülhalad, viszont arra is van példa, hogy több celláról csak egy vagy nulla elemi mérés ad információt. Az ilyen feladatokat a csillapított legkisebb négyzetek módszerével kell megoldani.

A legkisebb négyzetek módszerének alapja, hogy az elméleti és a mért eredmények különbség négyzetének minimalizálásával egy reális kiegyenlített eredményre jutunk. Először tehát vegyük az ismeretlen kiegyenlített mérési eredményekből alkotott vektort és vonjuk ki belőle az ismert valóban megtörtént mérési eredmény vektort. $v = U - y$. Az eredmény, vagyis a v javítás vektor négyzetét az önmaga és transzponáltjának szorzata adja meg, ami az egyes mérésekre vonatkozó javítások négyzeteinek összege, egy skalár szám lesz. A mérések nem minden esetben rendelkeznek azonos súllyal. Ekkor a $v^T \cdot P_{II} \cdot v := \min$. egyenletet kell használnunk, ahol P_{II} a súlymátrix. A súlymátrix inverze a kovariancia mátrixszal arányos. Egymástól független mérések esetén a súlymátrix egy olyan diagonális mátrix, amelynek főátlójában a mérések szórásnégyzetének reciprokai találhatók. Így a nagyobb szórású vagyis bizonytalanabb mérések kisebb súlyt kapnak, mint a kis szórású, jobb minőségű mérések. A direkt feladatban lévő U kiegyenlített mérési eredményt a megismert v és y összegeként írható fel. A kiegyenlített X paramétervektort egy ismert, X_0 kezdeti paramétervektor és az inverzió során megismert x javításvektor összegeként áll elő.

Behelyettesítve a direkt feladatba a következőt kapjuk:

$$L+v = A \cdot X_0 + A \cdot x = a_0 + A \cdot x,$$

ahol a_0 a kezdeti feladat kezdeti paraméterek szerinti megoldása. Fejezzük ki az egyenletből v -t:

$v = A \cdot (L - a_0)$, ahol $(L - a_0) = I$, a tiszttag, vagyis a mért értékek és a kezdeti paraméterek megoldásának különbsége. Helyettesítsük be a $v = A \cdot x - I$ javítási egyenletnek nevezett összefüggést a $v^T \cdot P_{II} \cdot v := \min$ egyenletbe, majd keressük meg a minimumát, vagyis deriváljuk és tegyük egyenlővé nullává.

$(Ax-I)^T P_{II} \cdot (Ax-I) = Ax^T \cdot P_{II} \cdot Ax - I^T \cdot P_{II} \cdot A \cdot x - A \cdot P_{II} \cdot x^T \cdot I - I^T \cdot (P_{II} \cdot I)$ x szerinti parciális deriváltja: $AT \cdot P_{II} \cdot A \cdot x = AT \cdot P_{II} \cdot I$, amiből

$$x = (AT \cdot P_{II} \cdot A)^{-1} \cdot (AT \cdot I).$$

x tehát azt a javítást jelenti, amit a kezdeti paraméterekhez hozzáadva, megkapjuk minden cellára a korrigált sűrűséget.

$$s = s_0 + x$$

Ha a korrigált sűrűség valamelyik cellában megegyezik 0 g/cm^3 -vel, akkor ott üreg található.

4. A szimuláció eredményei

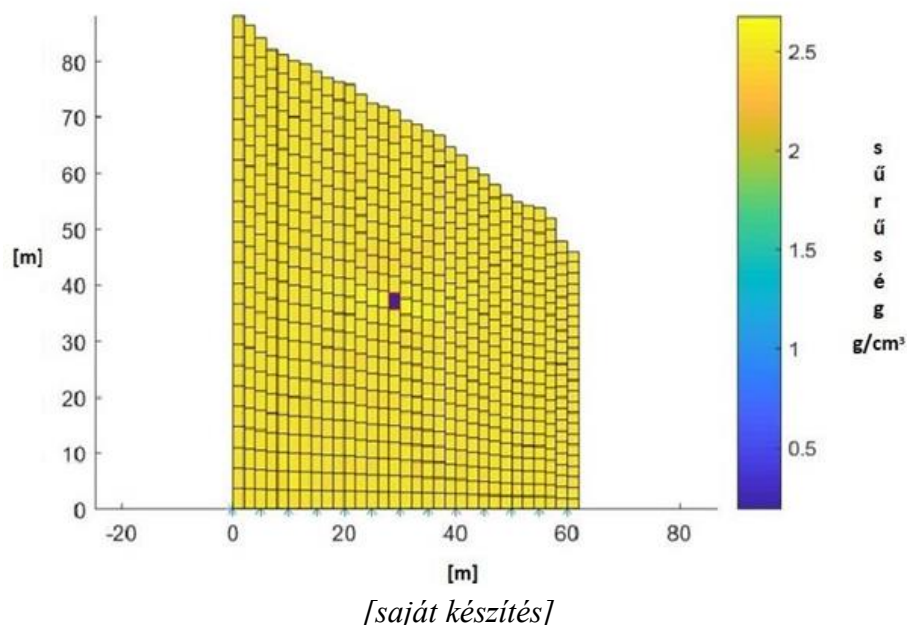
Először azt feltételezem, hogy a detektor feletti közettest homogén izotróp, a méréseket pedig ideálisnak tekintem. Ebben az esetben a paraméterek javítása egy csupa 0 elemű vektor, ami nem okoz változást a kezdő paramétervektorokban. Végül ábrázolom a cellákra felosztott sűrűség szerint színskálázott domboldalt.

Ezután megnézem, hogy a szimulált mérésekben elrejtett barlang hogyan jelenik meg a sűrűségképen. A szimulált mérés kiszámításomhoz az A mátrixot úgy hozom létre, hogy a barlanghoz létrehozok egy új cellát, ami pontosan illeszkedik az egyik már létező, a tér közepén elhelyezkedő cellához. Az A mátrix így egy extra oszloppal lesz nagyobb, ami ugyanazokat a méréshosszokat hordozza az egyes méréseknél, mint a rá illeszkedő másik cella. Az előzőhöz képest 1-el nagyobb szimulált sűrűségvektor utolsó tagja pedig -2.5-el legyen egyenlő. Így a barlangon átfutó szimulált mérések sűrűségösszege a barlangban megtett hossz -2,5 szorzatával

lesz kevesebb. Ha az inverzió megfelelően működik, akkor a sűrűségképen pontosan látszódni fog a barlang helye. Természetesen az inverziónál az eredeti A mátrixot használom. Az első modellben a 5 m-enként végeztem méréseket, a detektor szögfelbontása 1° . Az 5. ábrán látható, hogy az inverzió eredményéből tökéletesen kiolvasható a kék színnel jelölt, 0 g/cm^3 sűrűségű cellából barlang helye.

A barlangok keresése azonban nem ilyen egyszerű feladat, hiszen a számos környezeti tényezőtől, mérési és feldolgozásból származó hiba zavarhatja meg a valósághoz tökéletesen illeszkedő sűrűségképet. A továbbiakban sorra vesszük a zavaró jelenségeket, szimuláljuk őket és megvizsgáljuk, hogy hogyan hatnak a sűrűségképre.

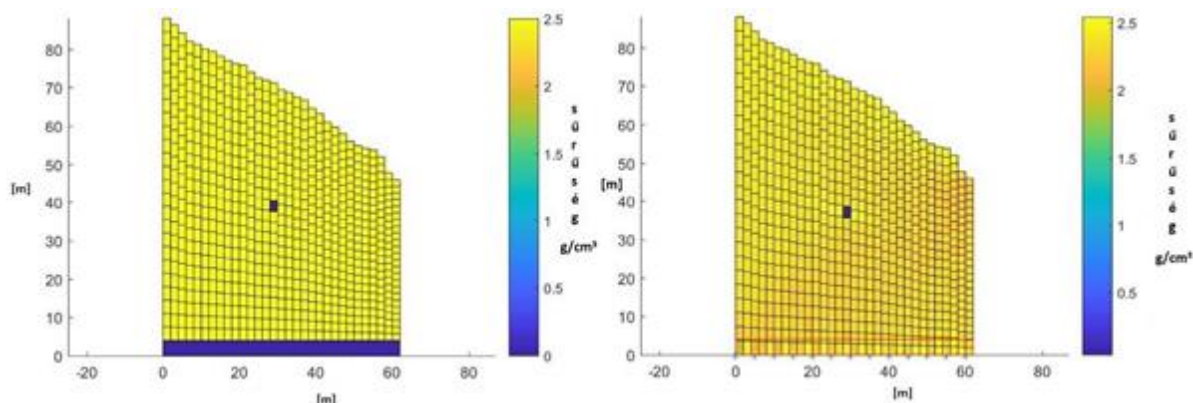
5.ábra: A hegyoldal inverzióval meghatározott belső sűrűség térképe ideális mérési feltételek mellett



4.1.Környezeti tényezők hatásai

A WIGNER csoport a Királylaki táróban végezte méréseit. Nem elhanyagolható a levegővel kitöltött táró magasságának hatása. A szimulációban egy 4 m belmagasságú tárót szimuláltam a barlangok szimulációjához hasonló módon (6. ábra).

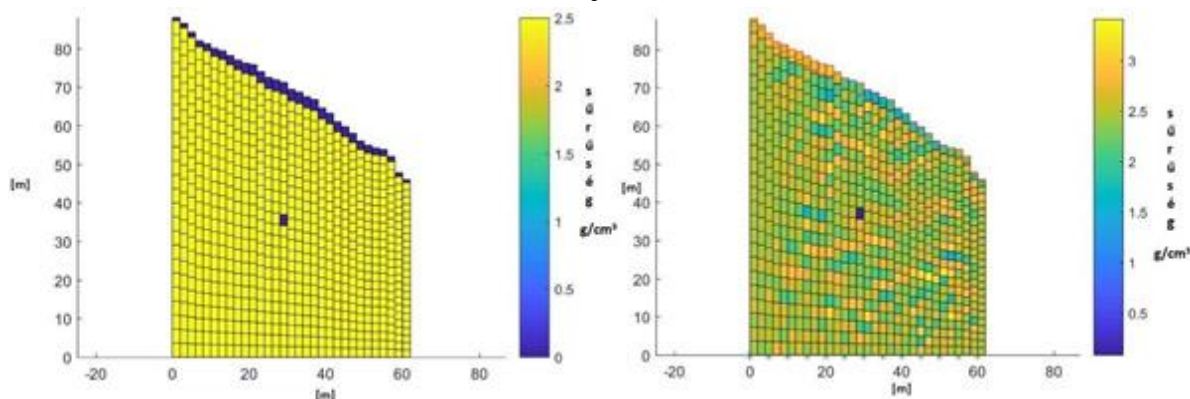
6.ábra: A hegyoldal inverzióval meghatározott belső sűrűség térképe egy 4 m belmagasságú táró jelenlétében jól megválasztott modell/cella paraméterekkel (bal) és egy általános modellen (jobb)



[saját készítés]

A sűrűségképen látható, hogy azokban a cellákban, ahol található detektor (kék csillag) lecsökken a sűrűség, de mivel minden mérést érint a sűrűség-hossz csökkenés, ezért a teljes sűrűségcsökkenést elosztja a cellák között és főleg a kép szélein látható nagyobb bizonytalanság. A WIGNER csoport 3D lézerszkennelést végzett a táró belsejéről. Ha rendelkezésre állna egy hasonló, másik forrásból származó pontos mérési eredmény és a modellben egy ugyanakkora méretű cellát választanánk meg a tárónak, akkor valószínűleg hibátlan végeredményt kapnánk. Ha erre nincs lehetőség, érdemes a domborzatmodellben az alagútnak egy nagyobb cellát megválasztanunk és több cellamagasságra kipróbálni, hogy mikor kapom a legszebb eredményt.

7. ábra: A hegyoldal inverzióval meghatározott belső sűrűség térképe 1,5 g/cm³ átlagsűrűségű, 0,5 m-3 m mély talaj jelenlétében jól megválasztott modell/cella paraméterekkel (bal) és egy általános modell/cella paraméterekkel megválasztott modellen (jobb)



[saját készítés]

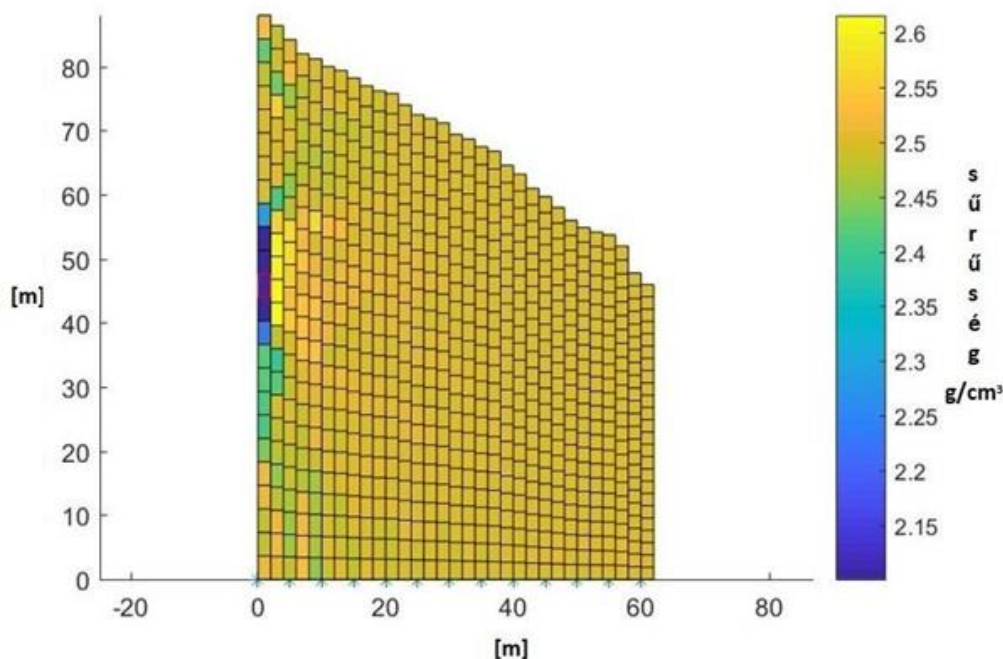
A Királylaki-táró feletti domboldal felszínén a megfigyelések szerint változó vastagságú, heterogén talaj található, ami erősen befolyásolja az eredmények értelmezését. Az alábbi képen (7. ábra) az látható, hogy egy 1.5 g/cm³ átlagsűrűségű talajréteg hogyan zavarja meg a teljes sűrűségképet. A talaj a szintetikus modell két szélén 0.5 m mély körüli, közepén pedig 3 m mélyre hatol. A szimulációt hasonló módon készítettem el, mint az alagútnál, csak a felszínhez helyeztem el a cellát és a szimulált sűrűségnek -1-et állítottam be. Látható, hogy közepén, ahol elég mélyen található a szálkő-talaj határa már 1.5 g/cm³-t mutat. A két szélén, ahol csak 0.5-0.8

m közötti mélységbe hatol a talaj, nem látható egyértelműen a talaj hatása, nem illeszkedik eléggé a modellbeli cellákhoz és ezért a modell egyéb területein hamis anomáliák jelennek meg. A WIGNER csoport geoelektromos méréseket is végzett, hogy ellenőrizze a műonmérések eredményeit. Ha nem áll rendelkezésünkre pontos más forrásból származó eredmény, akkor érdemes – a táróhoz hasonlóan – a modellbeli cellák méreteit addig változtatni, amíg nem illeszkedik a lehető legjobban a valóságbeli talaj geometriájához, vagyis amíg a legszebb képet nem látjuk.

4.2. A barlang méretének és elhelyezkedésének hatása

A szimuláción kipróbáltam, hogy az inverziós módszerrel hogyan változik a barlang megtalálhatósága, ha változtatom annak méretét és elhelyezkedését. Mivel a kép szélén lévő cellákat metszi a legkevesebb elemi mérés, ezért a kép közepétől távolodva csökken a barlang „láthatósága”. Ezt mutatja be a 8. ábra. Látható, hogy a legkisebb sűrűségű cellákban is legfeljebb 0.5 g/cm³-et csökken a sűrűség. Nem lehet megállapítani, hogy pontosan hol található a feltételezett üreg.

8. ábra: A hegyoldal inverzióval meghatározott belső sűrűség térképe kép bal szélső részén lévő barlang jelenlétében.

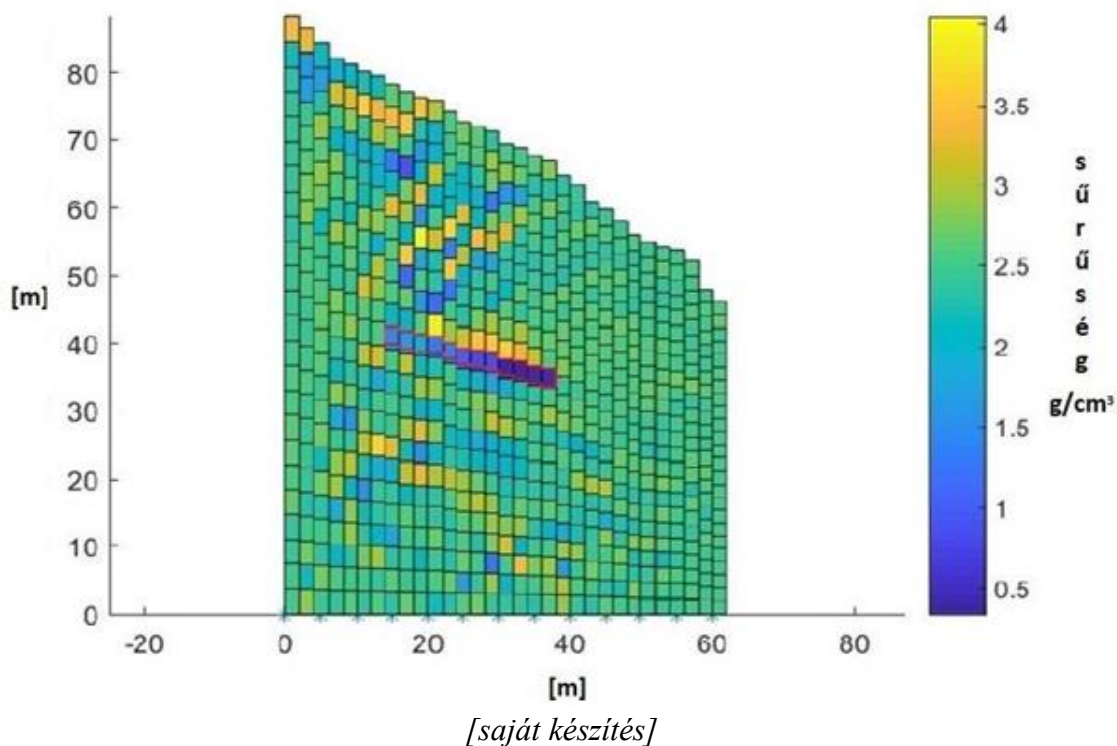


[saját készítés]

A barlang méretének csökkenésének és növelésének és formájának változtatásának hatása is változtatja az üreg detektálhatóságát. Nézzük, hogy az eredeti modellre hogyan hat egy nagyobb, keskenyebb barlang jelenléte. A negatív anomália tökéletesen látszódik, de más helyeken is megjelennek az átlagsűrűségtől eltérő sűrűségek. Látható (9. ábra), hogy a hosszú barlang jobb szélé jobban illeszkedik a modell celláihoz, ezért annak környezetében nem is jelennek meg hamis pozitív anomáliák és a jobbszélső cella sűrűsége áll a legközelebb a 0 g/cm³-hez. Balra

haladva viszont egyre kevésbé illeszkedik a cellákhoz, ami megzavarja a sűrűségképet. Ezt a problémát a modellbeli cellák változtatásával lehet megoldani.

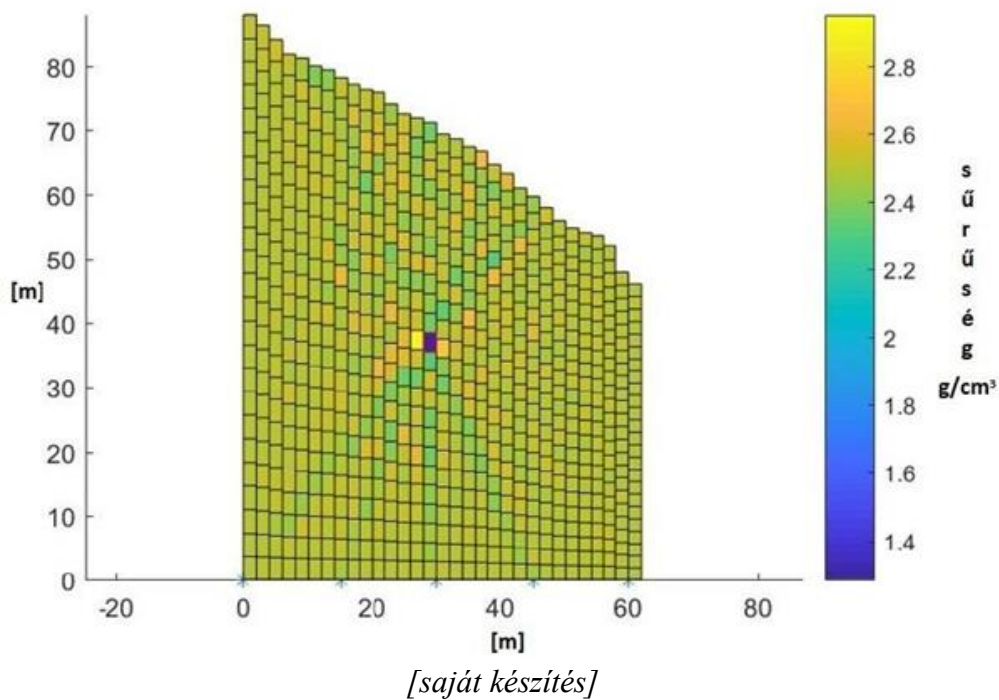
9.ábra: A hegyoldal inverzióval meghatározott belső sűrűség térképe egy hosszú 2,5 m belmagasságú barlang jelenlétében



4.3. Műon mérések során felmerülő problémák

Most tekintsünk olyan szimulációkat, ahol a mérés minőségével akadtak problémát, először fele annyi helyszínen (15 m-ként), vagyis arra keresem a választ, hogy mi történik, ha nincs elég rendelkezésre álló mérési adat (10. ábra). Látható, hogy a barlang mellett helytelen pozitív anomália jelenik meg. A barlangot metsző mérésekkel egy vonalban, a barlang körül csillagszerűen pedig kisebb negatív anomáliák jelennek meg. Ezek azért történnek, mert kevesebb mérésnél kevésbé biztos, hogy egy cellában lévő üreg hatása okozza a mérések sűrűségösszeg csökkenését és elosztja a negatívumokat az érintett cellákban.

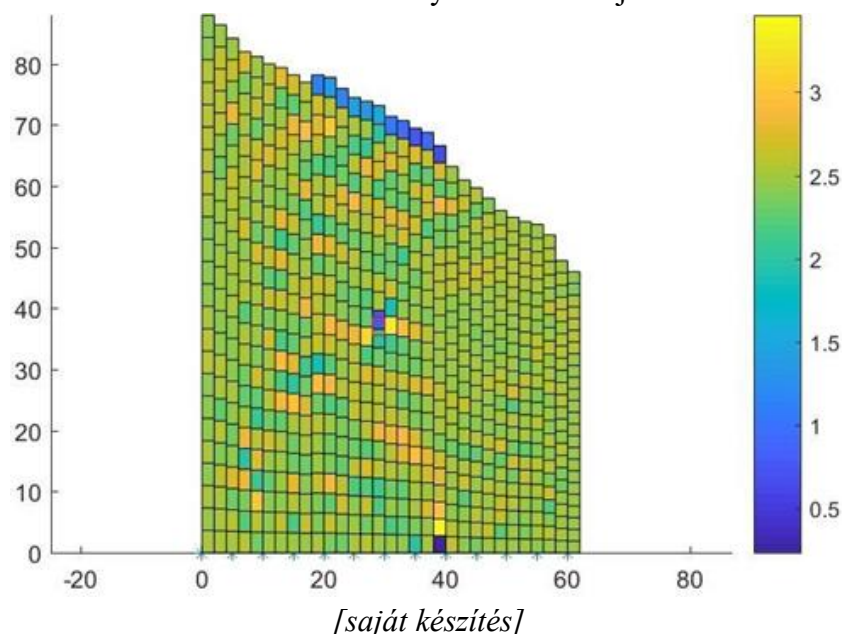
10. ábra: A hegyoldal inverzióval meghatározott belső sűrűség térképe a detektorok elhelyezésének 15 m-re ritkítása esetén



4.4. Geodéziai mérések során felmerülő problémák

A detektor és a domborzat pontos térbeli elhelyezése során felmerülő problémák is erősen befolyásolhatják a méréseink minőségét. A domborzat és a detektorok egymáshoz képesti elhelyezkedésén véletlen és a szisztematikus hibákat vétettem horizontális és vertikális irányban. A szisztematikus hibánál több domborzatpontot együttesen helyeztem el ugyanabba az irányban. A következő ábrán (11. ábra) a közepén elhelyezkedő 11 cellához tartozó felszíni pontokat azonosan 2 méterrel helyeztem felfelé. A hiba alacsony sűrűségként jelenik meg az érintett cellákban, mivel azok már 2 m-el a domborzat feletti légtérbe is belenyúlnak.

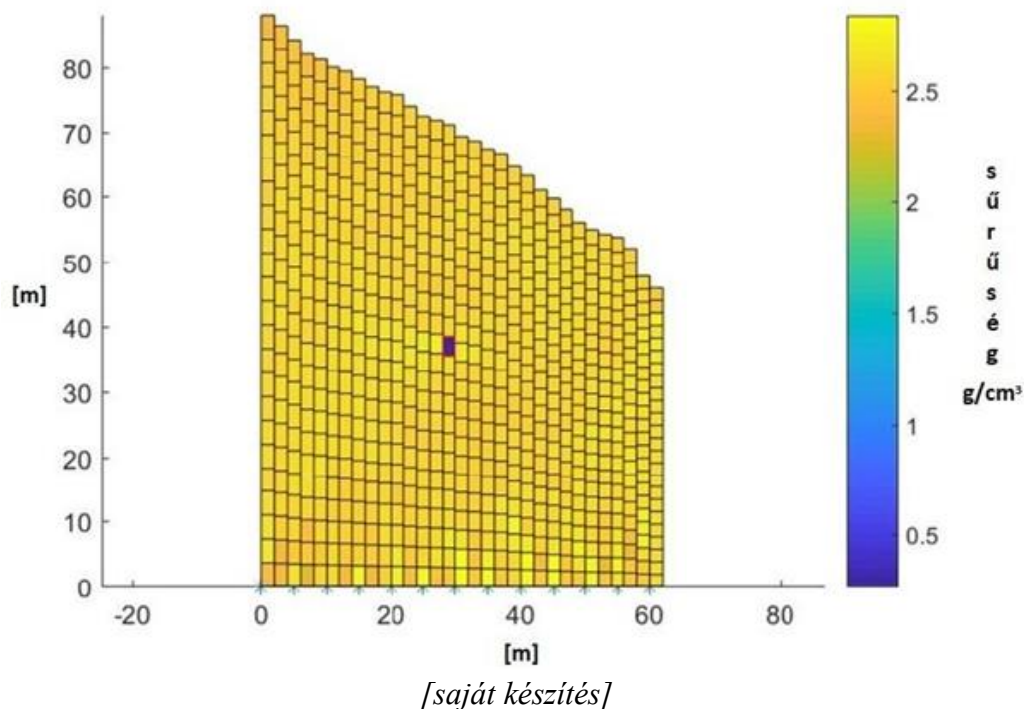
11.ábra: A hegyoldal inverzióval meghatározott belső sűrűség térképe néhány domborzatpont 2 méterrel való vertiákális irányba vétett hibája mellett



4.5. A feldolgozás során felmerülő problémák

Tekintsünk rá a feldolgozás során felmerülő hibalehetőségekre. A sűrűség hosszt a fluxusból egy szög- és behatolási mélységfüggő átváltással kapjuk meg. A módszer tapasztalati [Lesparre 2012] alapokon nyugszik, használatakor fennáll a hiba lehetősége. Az átváltásból származó hiba hatásának a modellezésére a zenitszög koszinusz négyzetével arányos hibát tételeztem fel. Az átváltás pontatlanságának mértékét egy súlyfaktorrallal való szorzással szimulálom. A szimulált mérésekhez hozzáadva a mérések koszinusz négyzetével arányos hibáját, majd ezt 2.5 súlyfaktorralszorozva, a következő képet kapjuk (12. ábra). A képen két formát vehetünk észre: az első az alsó szintek pozitív és negatív anomália csíkozottsága, amiket a detektorok ritkasága okoz, ahol nincs detektor az alsó szinten, azt csak valamilyen nagyon alacsony szögben érint mérés, vagyis sokkal nagyobb bizonytalanságú mérések érték őket. A másik pedig a kép két szélén lévő nagyon halvány háromszögek, amelyek a kis zenitszögű mérések által legkevésbé „látható” területek.

12. ábra: A hegyoldal inverzióval meghatározott belső sűrűség térképe szög szerinti szisztematikus hiba jelenlétében, 2.5 súlyfaktor esetében

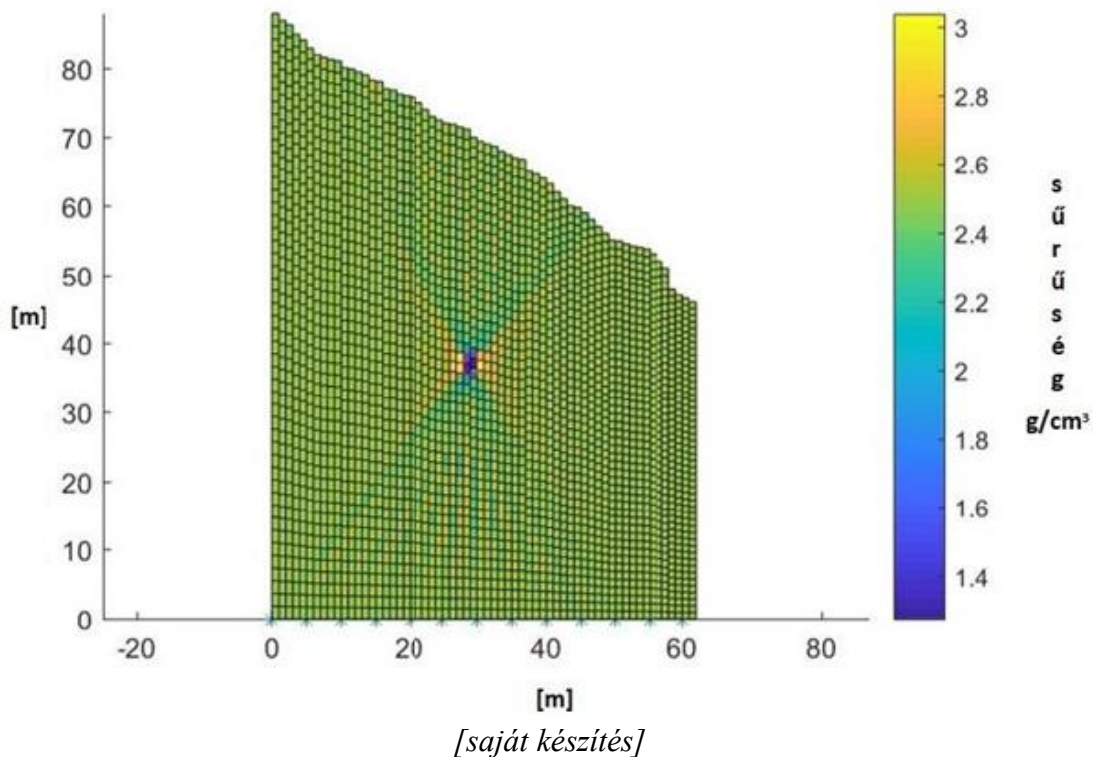


4.6. Modellparaméterek megválasztásához kötődő hibák

A modellparaméterek vagyis a cellák méretének megválasztásával sokat javíthatunk az inverziós eljárás eredményén. A cellaméret megválasztásának problematikája nagyon hasonlít a különböző méretű és elhelyezkedésű barlangok okozta hatásokkal. A korábbi példákban olyan eseteket vizsgáltam, amikor a barlang pont beleillett az egyik középen elhelyezkedő cellába.

Ha a cellák méretét az ideális mérethez képest pontosan a negyedére csökkentem (1 m x 0,9 m – 1,76 m), akkor a barlang pontosan 4 cella tartozik és teljes területükben 0 g/cm^3 a sűrűség. Itt sokkal kisebb a bizonytalanság, szebben kirajzolódik a barlang. A megjelenő hibák nagyon hasonlítanak a rossz minőségű műon mérések (kis szögfelbontás, kevés mérési hely) problémájánál tapasztaltakkal. Ez ennek ellenkezője, túl nagy a domborzatmodell felbontása a műonmérések minőségéhez képest (normális szögfelbontás 1° , és a mérési helyközök 5 m). Emiatt jelennek meg a barlang mellett helytelen pozitív anomáliák és a barlangot keresztező elemi mérésekkel egy vonalban, csillagszerűen negatív anomáliák.

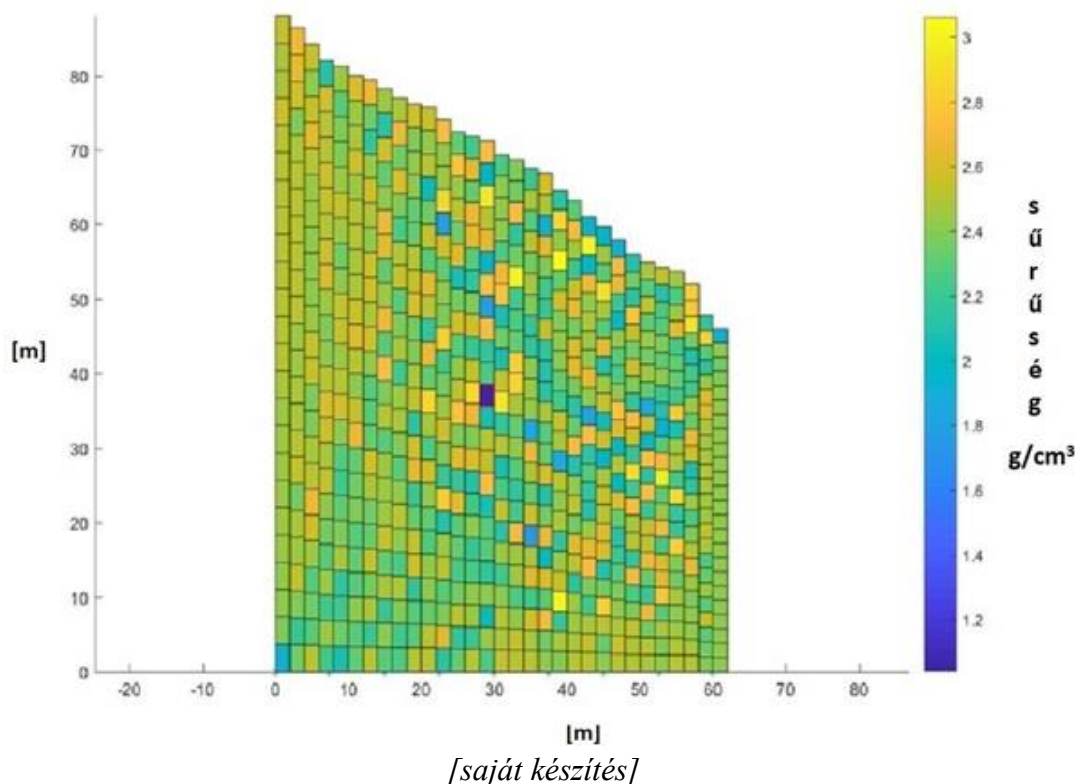
13.ábra: A hegyoldal inverzióval meghatározott belső sűrűség térképe negyed területű cellaméretekkel



4.7. A feldolgozás során született problémák hatásai

A következő ábrán (14. ábra) több probléma együttes hatását figyelhetjük meg. A szimulációban heterogén ($2.5 - 2.7 \text{ g/cm}^3$ közötti) közetsűrűségi szerkezetet, 4 m magas tárot és 0.5 – 3 m mély 1.5 g/cm^3 sűrűségű talajt helyeztem el. A mérési helyek közötti távolságot 7.5 m-nek, a szögfelbontást 1.5° -nak határoztam meg. A mérés rövidebb ideig tartott az ideálisnál, a szórást 0.1 súllyal szoroztam meg. Az előfeldolgozás hibáját 2.5 súllyal láttam el. A barlang okozta anomália megjelenik az ábrán. Így a felsorolt hibák mellett még megtalálható a keresett üreg.

14. ábra: A hegyoldal inverzióval meghatározott belső sűrűség térképe az ismert problémák együttes jelenlétében



4.8. Összefoglalás

A Királylaki-táróban végzett müontomográf mérésekhez hasonló szimulációimban több lehetséges zavaró tényezőt is figyelembe vettem. Inverziós módszerrel feldolgoztam a szimulált adatsorokat és megfigyeltem, hogy az eredményül kapott sűrűségképek milyen jellegzetes formák jelennek meg és, hogy hogyan változik a keresett üreg megtalálhatósága. Végül a hibák együttes hatását is megvizsgáltam. Kutatásom alapján arra jutottam, hogy inverziós módszerrel lehetséges a felsorolt hibák és mérési tényezők jelenléte mellett is az üreg megtalálása. Az eredmény minősége tehát függ a müon mérési feltételeinek minőségétől (mérési idő, mérési helyek közötti távolságok, detektor szögfelbontása), a geometriai mérések pontosságától (a detektorhelyek és a felszíni pontok pontos koordinátáinak ismerete) és az előfeldolgozás problémamentességétől (a detektált beérkezésekből fluxus majd sűrűség-hossz váltás).

Ha az inverzió eredményeként kapott sűrűségképben a felsorolt tényezőkre jellemző forma található, az valószínűleg az objektumon belüli sűrűségkülönbségeknek köszönhető. A tárra és a felszín alatti talajrétegre bemutattam azok jellegzetes módosító hatásukat az inverzió eredményére.

Különböző cellaméretre és barlangra is bemutattam az inverziós kép jellegzetességét. Hogy pontosan megismerjük a közegtől eltérő sűrűségű objektumok, pl. tárró, talaj, barlang pontos geometriáját és sűrűségét a domborzatmodell cellaméreteinek változtatását kell ismételnünk. Minél pontosabban illeszkednek a cellákhoz, annál pontosabb képet kapunk róluk. A barlangok megtalálhatósága erősen függ a modellen belüli elfoglalt helyétől is. Ha van rá lehetőség, akkor a feltételezett barlanghoz képest úgy kell elhelyezni a méréseket, hogy a barlang a mérésekkel átvilágított térrész közepébe kerüljön.

Hivatkozások

BARNAFÖLDI G. et al., (2011): „Kincskeresés Kozmikus Müonokkal – avagy kozmikus müondetektálás alkalmazott kutatásokban”, Fizikai Szemle, LXI. évfolyam, 12. szám, 401–407. oldal

BARNAFÖLDI G., (2012): „Portable cosmic muon telescope for environmental applications”, Nuclear Instrumental and Methods in Physics Research A, Vol. 689, pp. 60-69

LESPARRE, N. et al. 2012 Geophysics Journal Int. 190 pp. 1008-1019.

MOLNÁR G., (2013): „Geofizikai inverzió”, Eötvös Lóránd Tudományegyetem, ISBN: 978-963-284-385-8

OLÁH L. et al. (2012) „CCC-based muon telescope for examination of natural caves”, Geosci. Instrum. Method. Data Syst., 1, pp. 229-234

OLÁH L. et al., (2017): „Képképzés Kozmikus Részecskék Nyomkövetésével”, Fizikai Szemle 747. szám, 74–78 old.

OLÁH L. (2013): „Szerkezetvizsgálat kozmikus részecskékkel”, Természettudományi Közlöny, 144. évf., 4. füzet, 148-151 old.

SURÁNYI G. et al. (2016): „Sűrűséganomliás Helyének Meghatározása Nagy Energiájú Kozmikus Müonok segítségével”, Karsztfejlődés XXI

SZABÓ Z., (2012) „A Királylaki Barlang Feltárása”, ChnoInoky Jenő Karszt- és Barlangkutatsái Pályázat